

**Черный С. П., Емельянов К. А., Духнов Н. Н., Сотников И. А., Годяев А. И.**  
**S. P. Chernii, K. A. Emelyanov, N. N. Dukhnov, I. A. Sotnikov, A. I. Godyaev**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТОЙ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ**

**MODELING OF A DEVELOPED FUZZY CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-CONNECTED  
OBJECT UNDER CONDITIONS OF MULTICRITERIALITY**

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: керару@knastu.ru.

**Sergej P. Chernii** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: керару@knastu.ru.

**Емельянов Кирилл Андреевич** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ерапу@knastu.ru.

**Kirill A. Emelyanov** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ерапу@knastu.ru.

**Духнов Николай Николаевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ерапу@knastu.ru.

**Nikolai N. Dukhnov** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ерапу@knastu.ru.

**Сотников Илья Андреевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ерапу@knastu.ru.

**Ilya A. Sotnikov** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ерапу@knastu.ru.

**Годяев Александр Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщений (Россия, Хабаровск); 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47. E-mail: at@festu.khv.ru.

**Alexander I. Godyaev** – Doctor of Engineering, Professor, Head of Automation, Telemechanics and Communications Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk Territory, Khabarovsk, st. Serysheva, 47. E-mail: at@festu.khv.ru.

**Аннотация.** В связи с усложнением предъявляемых требований к системам автоматизированного управления в различных отраслях возникает исключительно важная проблема, связанная с созданием подобных систем. На сегодняшний день невозможно обеспечить качественное управление сложным объектом без системы управления, которая основана на достаточно точной математической модели. Такая модель должна учитывать большинство имеющихся подходов к формализации объектов регулирования, а именно: повышение точности и качества математического описания, возможность оперирования качественными характеристиками на основе сформированной системы ограничений и допущений. Некоторыми направлениями расширения интеллектуальных возможностей являются как структурные решения (реализация вложенности), так и параметрические (моделирование функций принадлежности пространственной формы). В рамках данной работы был выполнен синтез системы управления многодвигательной установкой, разработанная система управления представляет собой многокаскадный нечёткий регулятор.

**Summary.** Due to the increasing complexity of the requirements to automated control systems in various industries, there is an extremely important problem associated with the creation of such systems. Today, it is impossible to provide quality control of a complex object without a control system, which is based on a sufficiently accurate mathematical model. Such a model must take into account most of the existing approaches to formalization of control objects, namely: increasing the accuracy and quality of mathematical description, the ability to operate qualita-

tive characteristics based on the formed system of constraints and assumptions. Some directions of extending intellectual capabilities are both structural solutions (realization of nesting) and parametric ones (modeling of spatial form belonging functions). As part of this work, the synthesis of the control system of a multi-gear machine was performed; the developed control system is a multicascade fuzzy controller.

**Ключевые слова:** нечёткий логический регулятор, терм, нечёткое множество, лингвистическая переменная, функция принадлежности.

**Key words:** fuzzy logic controller, term, fuzzy set, linguistic variable, membership function.

*Исследования проводятся в рамках гранта № ВНО10/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».*

УДК 681.5.01:658.5

**Введение.** На сегодняшний день существует множество методик по внедрению нечётких регуляторов в системы управления объектами. Одной из таких методик является реализация многокаскадности нечёткого логического регулятора, которая позволяет повысить универсальность реализуемого регулятора, расширить его адаптивные свойства и значительно упростить процессы настройки и перенастройки; также реализация многокаскадного регулятора позволяет избавиться от информационной избыточности и алгоритмической сложности благодаря реализации в виде единого модуля [10; 11].

Кроме того, принятие решений с учётом множества критериев, действующих на систему управления, представляет собой отдельный класс задач, особенно если реализуемые критерии противоречат друг другу. В рамках данной работы представлено моделирование многокаскадной нечёткой системы управления для решения многокритериальных задач по управлению, обладающей достаточными универсальными свойствами для реализации работы многодвигательной системы. Объект управления представляет собой систему электроприводов постоянного тока различной мощности [1; 2; 3]. Задача по реализации закона регулирования для такого объекта с учётом сочетания ряда критериев управления лингвистически может быть сформулирована следующим образом: быстроедействие системы и отработка больших отклонений производится более мощным элементом системы электроприводов, а в целях экономии и при действии различных возмущающих факторов стабилизация системы проводится включением маломощного элемента.

Для реализации многодвигательной системы была выбрана модель электропривода, представленная на рис. 1. В данной модели подчинённого регулирования приняты настройки всех контуров управления на модульный оптимум [4; 5; 8].

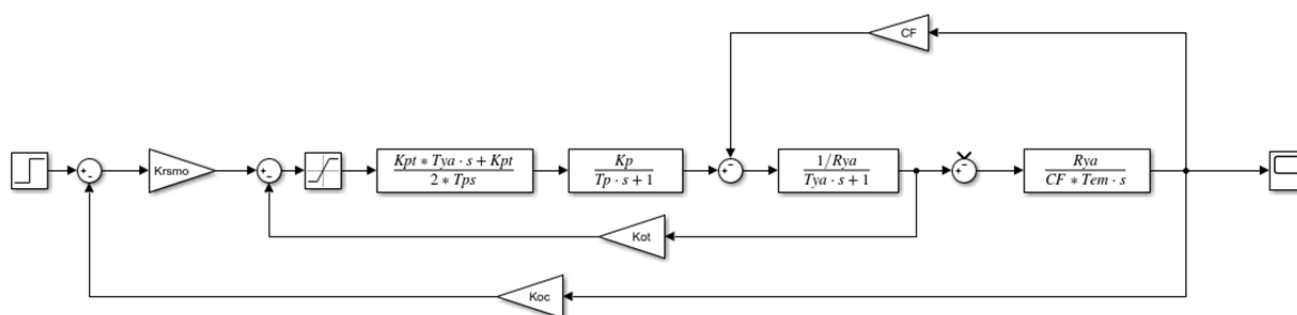


Рис. 1. Имитационная модель электропривода постоянного тока

Переходный процесс в системе электропривода постоянного тока, представленного имитационной моделью (см. рис. 1), показывает характеристика, изображённая на рис. 2.

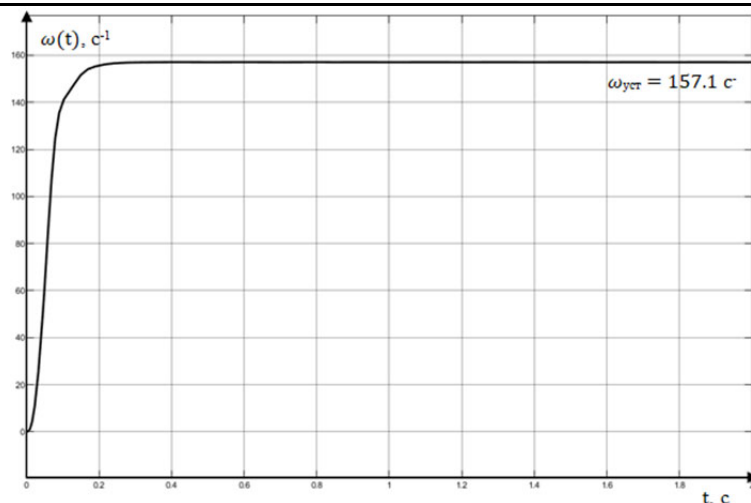


Рис. 2. Выходная характеристика имитационной модели

**Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора.** Нечёткая система управления таким многодвигательным объектом будет построена на основе многокаскадного подхода [6; 7; 9]. При таком построении развитой интеллектуальной системы управления на вложенные модули возлагаются функции управления отдельными электроприводами, а настройка параметров нечётких регуляторов будет осуществляться на основе общих представлений эксперта о поведении системы. Для синтеза нечёткой многокаскадной системы управления рассмотрим регулятор скорости, настроенный на модульный оптимум, и заменим его нечётким логическим регулятором.

Классический регулятор скорости для системы подчинённого регулирования, представленной на рис. 1, замещается элементарным нечётким логическим регулятором (НЛР) со следующей нотацией: механизм вывода Мамдани, единственные лингвистические переменные на входе и выходе регулятора, соответственно, терм-множества лингвистических переменных, формализующих понятия входных и выходных сигналов, определяются пятью элементами, функции принадлежности нечётких термов реализованы аппроксимированной формой, распределение нечётких термов лингвистических переменных входа и выхода принято равномерным и показано на рис. 3 и 4.

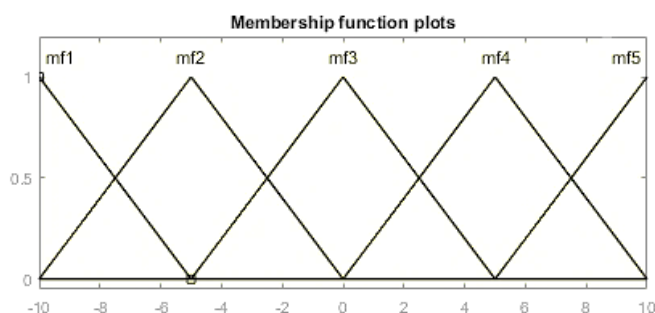


Рис. 3. Распределение нечётких термов лингвистической переменной «input1»

База знаний для вложенного нечёткого модуля представляет собой полный перечень нечётких продукционных правил следующего содержания:

1. *Есть (input1 есть mf1) тогда (output1 есть mf1)*
2. *Есть (input1 есть mf2) тогда (output1 есть mf2)*
3. *Есть (input1 есть mf3) тогда (output1 есть mf3)*
4. *Есть (input1 есть mf4) тогда (output1 есть mf4)*
5. *Есть (input1 есть mf5) тогда (output1 есть mf5)*

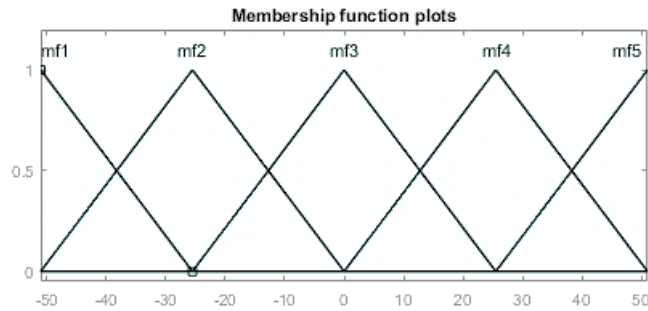
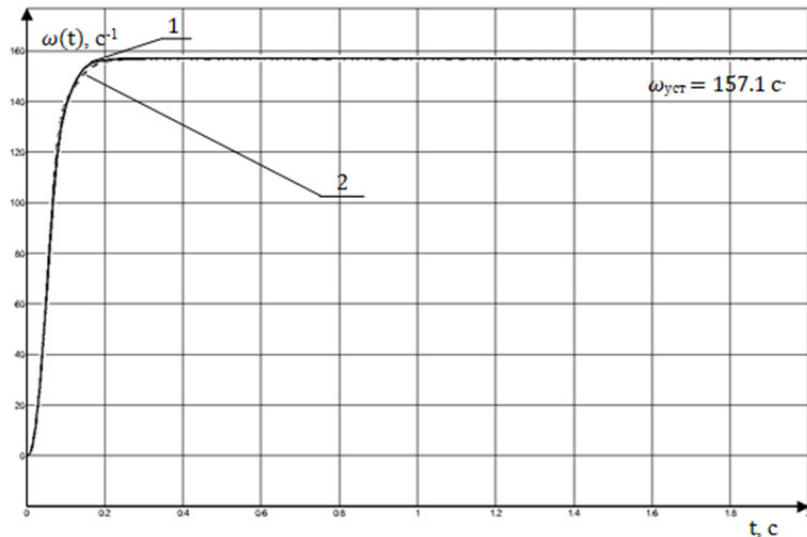


Рис. 4. Распределение нечётких термов лингвистической переменной «output1»

Выходная характеристика полученной системы при её сравнении с исходной моделью с классическим регулятором представлена на рис. 5.

Для построения нечёткого логического регулятора, формирующего внешний каскад на основе полученных данных, и с учётом обозначенного ранее ряда критериев необходимо выделить перечень требований, основными среди которых будут следующие:

1. осуществлять постоянный контроль главного электропривода в зависимости от поступившего на основной регулятор задания;
2. включать вспомогательный электропривод в моменты образования незначительных провалов в работе основного электропривода;
3. регулировать уровень выходного сигнала вспомогательного электропривода таким образом, чтобы его выходной сигнал мог компенсировать появившуюся просадку и поддерживать выходной сигнал всей системы на заданном уровне.



- 1 – выходная характеристика полученной системы;
- 2 – выходная характеристика исходной системы

Рис. 5. Выходная характеристика имитационной модели с НЛР

На основании изложенных требований можно сформулировать набор входных данных и сигналов, при обработке которых внешний каскад развитой нечёткой системы управления сможет формировать сигналы задания для элементарных модулей внутреннего каскада и реализовывать выполнение всех возложенных на него задач:

1. Канал обратной связи по скорости вращения основного электропривода, что соответствует информационной составляющей, позволяющей контролировать текущее состояние выходного сигнала основного электропривода.

2. Интегральную составляющую сигнала ошибки по скорости основного электропривода, что позволяет отслеживать наличие внешнего возмущающего фактора, а именно время появления просадки по скорости и её величину.

3. Преобразованный сигнал ошибки основного электропривода с целью выявления и реализации дополнительного критерия по управлению, а также определения диапазона изменения сигнала ошибки при выявлении условий применения дополнительного электропривода. Один из вариантов структурного решения по преобразованию сигнала ошибки представлен на рис. 6.

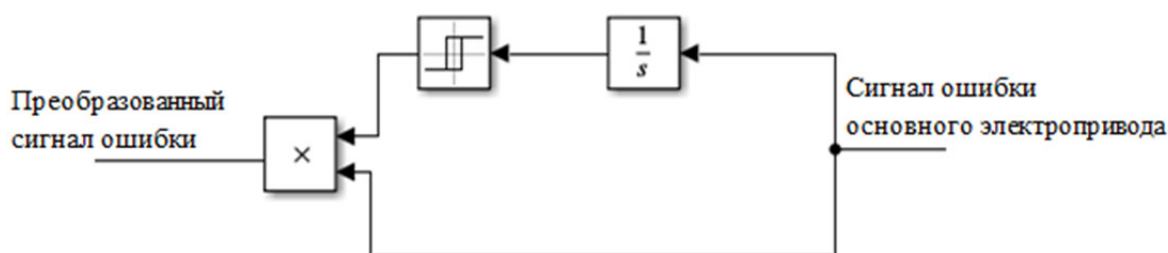


Рис. 6. Структурная схема преобразования сигнала ошибки

Наличие перечня требований и набора необходимых информационных зависимостей сигналов задания формирует не только структуру и основные элементы внешнего каскада развитого нечёткого регулятора, но и определяет функционирование его базы правил.

Внешний каскад интеллектуальной системы управления формируется на основе нечёткого логического регулятора, который в системе реализует функции классификации входных сигналов и анализа текущей ситуации с учётом выполняемого критерия и состоит из двух лингвистических переменных на входе и выходе соответственно. Функциональная схема регулятора внешнего каскада показана на рис. 7. В основу такого интеллектуального модуля заложен алгоритм нечёткого логического вывода Мамдани.

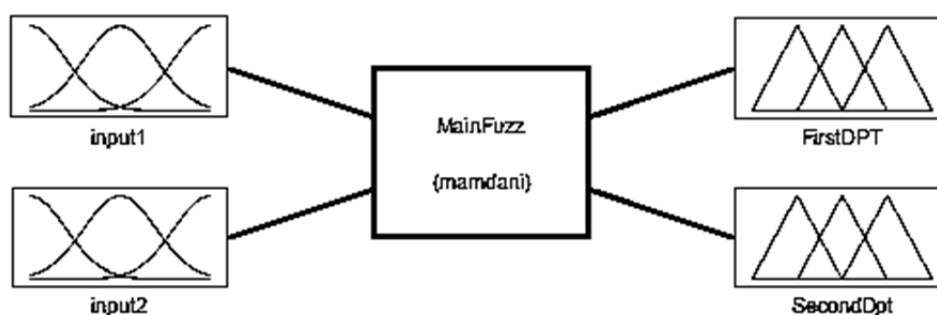


Рис. 7. Функциональная схема нечёткого логического регулятора внешнего каскада

Лингвистическая переменная *input1* – «ошибка системы управления по скорости» – имеет терм-множество, которое описывается набором термов *mf1*, *mf2*, *mf3*, *mf4*, *mf5*. Область определения терм-множества лингвистической переменной включает в себя пять нечётких функций принадлежности треугольного вида, равномерно распределённых по заданной области определения. Лингвистическая переменная *FirstDpt* формализуется аналогичным набором и формирует закон регулирования основным электроприводом.

Лингвистическая переменная *input2* – «интегральная составляющая ошибки» – имеет собственное терм-множество, формируемое двумя нечёткими переменными (см. рис. 8) с функциями принадлежности трапециевидной формы.

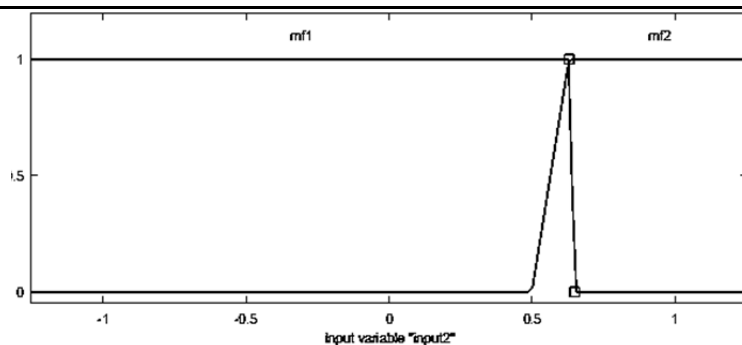


Рис. 8. Размещение нечётких термов лингвистической переменной input2

Формирование закона управления вспомогательным электроприводом обеспечивается лингвистической переменной «SecondDpt» (см. рис. 9) с двумя аппроксимированными функциями принадлежности.

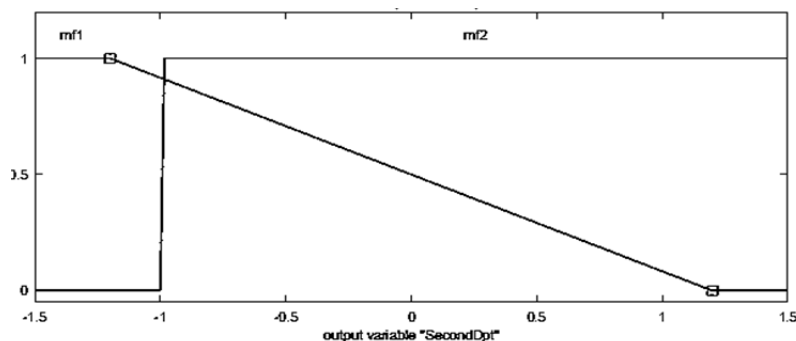


Рис. 9. Размещение нечётких термов лингвистической переменной SecondDpt

База знаний регулятора представляет собой следующий перечень:

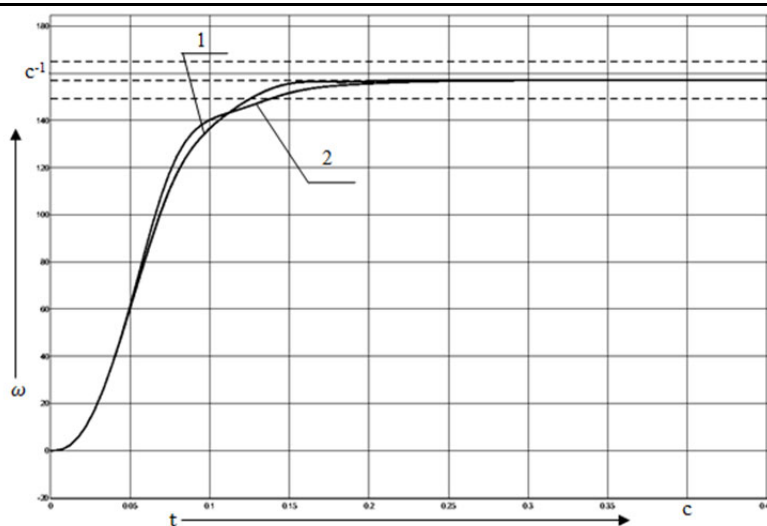
1. Если «input1» есть mf1, то «FirstDPT» есть mf1;
2. Если «input1» есть mf2, то «FirstDPT» есть mf2;
3. Если «input1» есть mf3, то «FirstDPT» есть mf3;
4. Если «input1» есть mf4, то «FirstDPT» есть mf4;
5. Если «input1» есть mf5, то «FirstDPT» есть mf5;
6. Если «input2» не есть mf1, то «SecondDPT» есть mf2.

Условие, задаваемое правилом № 6, ориентировано на выполнение дополнительного критерия по управлению и реализует функцию подключения вспомогательного электропривода.

**Результаты моделирования.** Применение развитой нечёткой системы в условиях многокритериальности не снижает требований к ней в части улучшения основных показателей регулирования, реализуемых любой классической системой управления. Проведём оценку полученной многокаскадной нечёткой системы с учётом сокращения времени регулирования и снижения величины перерегулирования.

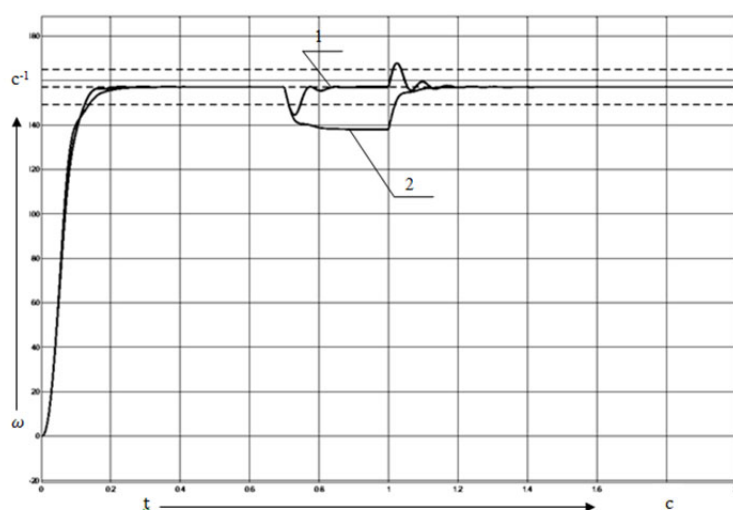
Проанализируем поведение полученной модели с нечётким многокаскадным регулятором и сравним реакцию систем с нечётким и с классическим регулятором на номинальный входной сигнал – единичное ступенчатое воздействие (см. рис. 10).

На основании полученной на рис. 10 характеристики можно сделать вывод, что система, в которой используется многокаскадный нечёткий регулятор, выходит на заданный уровень и имеет лучшие показатели регулирования: меньшее время регулирования и отсутствие перерегулирования. При этом необходимо отметить, что представленная характеристика достигается только за счёт реализации процедур управления более мощной частью многодвигательной системы и на данном этапе не приводит к использованию канала меньшей мощности.



1 – система с нечётким регулятором; 2 – система с классическим регулятором  
 Рис. 10. Реакция системы на подачу сигнала задания

На рис. 11 представлены переходные процессы в системе в результате действия внешнего воздействия, имеющего импульсную природу. При этом прогнозируемое поведение классической системы управления обеспечивает функционирование системы исходя из заданных требований и показателей качества. Интеллектуальная система имеет расширенные адаптивные свойства, что позволяет ей гибко реагировать на изменения внешних условий за счёт подключения канала управления с приводом меньшей мощности. Необходимо отметить, что параметры импульсного возмущающего воздействия были подобраны таким образом, чтобы использовать оба возможных канала управления.



1 – система с нечётким регулятором; 2 – система с классическим регулятором  
 Рис. 11. Реакция систем на подачу импульсного возмущающего воздействия

**Заключение.** Исходя из представленных результатов имитационного моделирования, полученная система управления многодвигательной установки на базе нечётких регуляторов способна обеспечить работу объекта регулирования как в номинальном режиме, так и при подаче на систему внешнего возмущения. С учётом дополнительных возможностей как по управлению, так и с точки зрения исполнительных устройств показано применение дополнительного критерия,

позволяющего решать вопросы энергоэффективности. Применение развитых нечётких систем придаёт объекту регулирования гибкость как при реализации процедур управления, так и в процессе функционирования, что существенно отличает предложенный подход от классических принципов. Однако наличие элементарных модулей во внутреннем каскаде может привести к необходимости коррекции таких элементов в части внедрения дополнительных лингвистических переменных с целью снижения недостатка информации о функционировании технологического процесса и поиска компромиссных решений в условиях многокритериальности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 23-28.
2. Стельмашук, С. В. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование / С. В. Стельмашук, А. Ю. Чернов // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 256-265.
3. Savelyev D. O., Gudim A. S., Solovev D. B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. 2019. P. 8725324. DOI: 10.1109/Eastconf.2019.8725324.
4. Башарин, А. В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
5. Стельмашук, С. В. Согласованное управление транспортировки ленты с модальным регулятором / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (38). – С. 28-40.
6. Соловьев, В. А. Нечёткое управление в системе регулирования позиционных электроприводов стержневой установки / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, В. В. Тетерин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 5. – С. 77-80.
7. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.
8. V. I. Susdorf, A. S. Meshkov and M. T. Aung, International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon, Vladivostok, 2018), p. 8602556. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602556.
9. Cherniy S. P. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva, V. I. Susdorf, V. N. Khrulkov. – EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2020, ew 18: e19. DOI:10.4108/eai.13-7-2018.165496.
10. Piegat, A. Horizontal membership function and examples of its application / A. Piegat, M. Landowski. – International Journal of Fuzzy Systems, 2015, 17(1), p. 22-30.
11. Mazandarani, M. Sub-optimal control of fuzzy linear dynamical systems under granular differentiability concept / M. Mazandarani, N. Pariz. – ISA Trans 2018;76:1-17.
12. Mazandarani, M. A Review on Fuzzy Differential Equations / M. Mazandarani, L. Xiu. – IEEE Access, 2021, 9, p. 62195-62211.